

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420560

研究課題名(和文) 常時微動の部分測定記録に基づく建物の局所的な損傷検出に関する研究

研究課題名(英文) Study on local damage investigation of building structure using ambient vibration records

研究代表者

飯山 かほり (Iiyama, Kahori)

東京工業大学・環境・社会理工学院・研究員

研究者番号：90711870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、既存建物の構造健全性診断に有用となる損傷評価、特に局所的な損傷の実用的な評価方法の開発を目的としたものであり、振動測定に基づく方法を対象としたものである。著しく劣化した2棟の建物の微動アレー観測の記録分析および数値実験に基づく検討から、振動モード特性を利用した方法からは剛性変化が著しい場合にその変化位置の推定が可能と判断された。一方で、変化が極端でない場合、また、床等の局所的な特性の変化に対しては振動モード特性のみからでは推定が難しいこと、より簡素なパワースペクトル等が有効であることを示した。さらに、少ない観測記録から振動モード特性を解析的に求める方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：The object of this study is to develop a practical local-damage-detection method of building structures, which is based on ambient vibration measurement. From the analysis of vibrational characteristics based on high-density array measurements for severely deteriorated buildings through the Frequency domain decomposition (FDD) technique, and the numerical study using the multi-dimensional flame model, the followings were revealed; 1) If the local stiffness of building structures extremely changes, the location of it can be identified using identified modal properties, that is, natural frequency and eigenmode. 2) If the local stiffness of building structures slightly changes, to detect its local damage is quite a task and then such an auto-power spectral density can be practical indicator. Furthermore, a new modal identification method which uses only two measurement points was analytically developed.

研究分野：地震工学

キーワード：構造ヘルスマニタリング 固有振動数 固有モード モード減衰定数 常時微動 損傷同定

## 1. 研究開始当初の背景

『構造ヘルスマニタリング』とは、構造物にセンサを設置して、センサで測定したデータを信号処理して損傷箇所と損傷レベルを把握し、構造物の健全性を判定する方法である。1970年代以降、建築分野においても建物の構造ヘルスマニタリングが注目され、特にノースリッジ地震(1994年)、兵庫県南部地震(1995年)を受けて以降では数多くの研究が行われているが、いずれの手法にも課題が少なくなく、依然として発展途上にある。

この構造ヘルスマニタリングには様々な方法があるが、本研究では建物の応答のみから構造特性を評価できる“振動計測に基づく方法”を対象としている。計測対象は地震動と常時微動とに大別されるが、常時微動は、振動計を建物に常設する必要がある地震観測とは異なり、損傷が生じた瞬間の構造変化を捉えることは出来ない反面、建物を選ばずいつでも測定を行える特長がある。また、振動計を移動させながら測定を行うことで、限られた台数の振動計でも建物内の多くの箇所の状態を調べることができることから、常時微動を利用した方法では有効である。

この方法による損傷評価の試みには、剛性などに代表される建物の“構造特性”を直接求めたり、“伝達特性”の変化を調べたり、また固有振動数や固有モードといった“振動モード特性”を同定し、これを介して構造特性の変化を調べる方法が主である。これらの方法の共通した課題として、「地震で損傷した実建物の詳細な振動特性について調べた研究が極めて少なく、そのため数値実験や振動台実験で得られた知見を実建物で検証できていないこと」が挙げられる。このことから、常時微動を利用した構造ヘルスマニタリング手法を発展させるためには実測データに基づく研究の充実が不可欠であり、また実用的な損傷検出方法を開発するために、実測データに基づく方法の課題や適用限界をも明らかにすることが重要である。

### <引用文献>

E.P. Carden et.al.(2004):Vibration based condition monitoring : A review, *Structural health monitoring*, Vol 3(4), 355-377.

## 2. 研究の目的

本研究は、既存建物の構造健全性診断に有用となる損傷検出方法、損傷評価方法の開発を目的としている。具体的には、損傷建物の高密度アレー観測による常時微動記録から建物の局所的な振動特性を調べ、またその損傷前後の変化にも着目し、局所的な損傷の有無、位置及びレベルを評価するための実用的な方法を見出そうとするものである。既往研究では数値実験や振動台実験に基づくアプ

ローチがあるものの既存建物の実測例が少なく、例えば損傷建物の床面上等を含めた部分的な微動測定例は殆ど無い。このため、既往の数値実験や振動台実験で得られた知見の検証は極端に不足しており、診断手法の実用化には多くの課題が残されている。本研究では、実測記録から得られる情報を分析・整理し、簡易で実用的な健全性診断手法の発展のためのデータを蓄積したいと考えた。そこで、今回取り上げた課題とその目的を以下に列挙する。なお、実測記録を利用した検討を踏まえての具体的な課題も挙げている。

### 課題 1: 測定データの信頼性精査および使用データ区間の選定

本研究では、得られた測定データからノイズなどの悪影響を可能な限り除去し、質の高いデータ区間を検討に用いることが非常に重要である。使用する全データについて、丁寧なチェックと解析に使用するデータ区間の選定を行う。

### 課題 2: 振動特性の整理～フレームモデルとの比較検討

建物の全体および床振動特性に関する情報を常時微動からどこまで引き出せるかを調べるために、まずは構造が単純な建物の床面上の微動データから基本的な振動特性について分析・整理する。ただし、常時微動測定から得られるデータはノイズ等の影響を受け複雑であることが予想されるため、測定データ分析においては振動を概略的に説明する根拠として、設計値または実測値に基づいた立体フレームモデルによる固有値解析を実施し、微動測定による振動特性と比較する。

### 課題 3: 振動特性の把握のための課題の抽出

フレームモデルとの比較に対し、より詳細な分析を行う。分析では、建物のモデルのうち例えば地盤バネの設定、部材剛性の設定、及び床梁の接続条件の設定に焦点を当て、振動特性への影響を調べる。併せて、実建物の常時微動測定から床振動特性を把握するために必要となる測定位置と数、測定時間、機器の測定条件について考察する。考察のために、既存の測定記録を補完する追加測定を実施する予定である。これらの結果に基づき、床振動特性の把握に際しての現状の課題についても抽出する。

### 課題 4: 損傷建物の床振動特性の整理～フレームモデルとの比較

損傷レベルの異なる建物において、損傷評価の前段として床振動特性を評価するために、常時微動から得られる床振動特性を整理し、立体フレームモデルとの比較を行う。

### 課題 5: 既往研究の適用性検証～モード特性検出のための方法論の提案

損傷レベルの異なる建物の振動特性の違いを分析する。また、既往の数値実験や振動台実験に見られる損傷同定方法を本データに適用し、適用性検証を行う。これらの結果に基づき、損傷評価のための有効な評価指標について考察する。

最後に、部分測定データを利用した振動理論に基づくモード特性同定法を開発する。

### 3. 研究の方法

一般に、建物を対象とした常時微動測定記録を利用した研究のうち、振動モード特性を利用する方法では、振動モード特性のうち特に固有振動数以外は、指標としての感度は必ずしも高くない。このため、損傷や劣化の度合いが小さい場合には、理論の検証そのものが困難となることが予想される。さらには、常時微動の振幅レベルが低いことによる記録の SN 比の問題もある。これを踏まえ、本研究では対象建物として、周辺に人間活動がない場所（外乱が少ない場所）に位置する構造部材が「著しく」劣化したコンクリート系建物 2 棟（建物 1：7 階建 SRC 造，建物 2：9 階建 SRC 造）を対象として、センサ 15 台 3 成分（45ch）による多点同時微動測定を行った。（ただし、申請者の所属変更に伴い、当初予定していた測定データの利用が不可能となったことを補足する。）

この記録を利用して、上述 2. で挙げた各課題に対し、以下の方法に基づき検討した。

課題 1：  
1) 使用データ区間を短いサンプル波形に分け、“標準偏差”および“最大値 / 標準偏差”が特異なサンプルについては時刻歴波形及びフーリエスペクトルを確認し、ターゲットとする周波数帯域において特異的と判断されるサンプルを除去する。

2) パワースペクトルや伝達関数、コヒーレンスを分析し、異常なデータを除去する。

課題 2：

1) 伝達関数およびコヒーレンスに基づく基本分析、振動数ごとの振幅、位相特性の評価

2) FDD 法による各床の固有振動数および立体振動モードの同定

3) 設計値に基づく立体フレームモデルの作成、固有値解析

4) 実測データに基づくモード特性と設計値に基づくモード特性との比較及び分析

課題 3：

1) フレームモデルのパラメータ解析による、微動データに基づく立体振動特性との比較

2) 測定時間や測定位置を変化させた同定解析

課題 4：

1) 現地写真に基づく損傷状況の整理およびとりまとめ、損傷度の評価

2) 上述「振動特性の整理～フレームモデルとの比較検討」と同様の方法

課題 5：

1) 伝達特性に基づく振幅評価、FDD 法による固有振動数および固有モードの評価

2) 振動特性の比較分析

3) 少ない測定点に基づくモード特性の評価

### 4. 研究成果

利用データ区間選定については、汎用的ではないため省略する。ただし、対象建物のように周辺の人間活動の影響がない建物（脈動、風は存在）では、交通振動等のある建物から得られた常時微動の例に比して 1/10 程度の振幅であった。このように微動の振幅レベルが小さい場合に、着目する振動数帯において感度が高いセンサを選定するか、センサの周波数特性との関係に留意しながら、データの信頼性を判断する必要があることを補足しておく。以下、課題 2～5 についての成果を述べる。

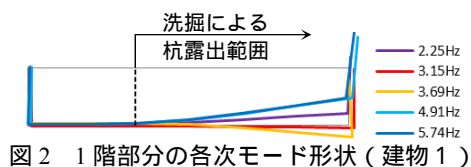
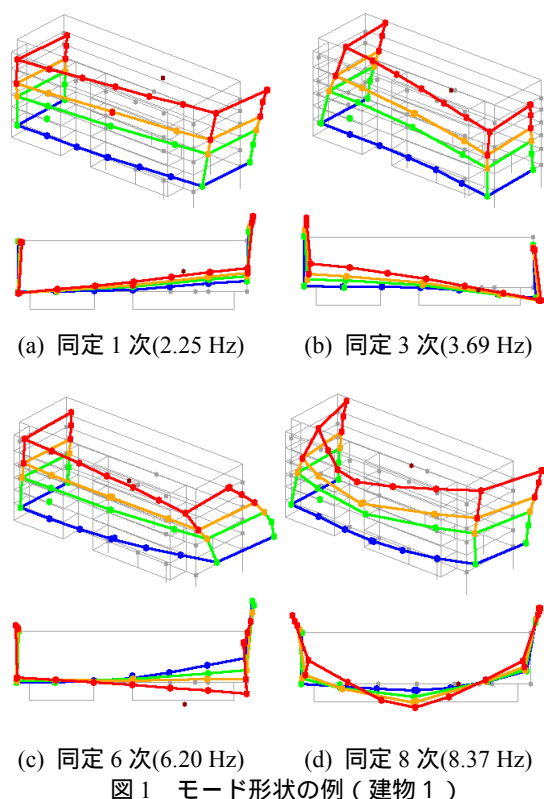
(1) 水平振動に関する局所損傷同定

フレーム構造としての評価を目的として、建物 1 における微動アレー観測記録の水平 2 成分を利用した。建物 1 は、著しい劣化と基礎杭の洗掘による露出が見られるため、これが微動測定記録からどの程度明瞭に表れるかが、第一の鍵となる。ただし、全体構造から建物の局所的な振動特性や状態を把握するために、測定は出来るだけフレームのジョイント部分に近い箇所の記録が必要であったが、使用可能センサ数が 15 台 < フレーム節点数であったため、同定から得られた各立体振動モード形を文献の方法に基づき重ね合わせた。

測定記録に対し FDD 法を適用した結果、例として図 1 に示すような対象建物の具体的な固有振動数および立体振動モードが得られた。本モード形状のうち、1 次モードは特徴的であり、長辺方向の片側のみが振動している。そこで 1 階部分のモード形状を抽出して重ねた結果（図 2）、振動モードの固定端が洗掘開始位置に相当することが読み取れる。この変化率（曲率）を求めることでこの位置の推定が可能であった。この結果から、振動モード形状を用いることで、基礎部の局所的な剛性低下を把握できる可能性が示唆された。

また、特に水平面内形状から、床が（剛体の回転運動でなく）せん断変形し、また面内 2 次モード(d)が見られるなど、剛性が小さいことの影響が顕著に現れていた。当該モードは、建物 1 の接合部が一般的な建物よりも柔であり、半固定のような状態であることが示唆され、数値モデル作成時の条件に考慮する必要がある。

以上、得られた振動モード特性から、同建物の微動時振動性状から杭の露出による基礎部の水平抵抗の低下、及び柱梁フレーム剛性と床剛性が全体として低いことなどが明らかとなった。基礎杭が露出していない1階の区間が固定端の役割を果たし、洗掘側が振れやすく、さらに短辺方向は柱・梁を含めた剛性と床面内剛性も低いために全体として振動性状が複雑となる可能性が示唆された。



そこで、現地測定で得た建物の柱・梁・床寸法に基づき立体フレームモデルを作成し、固有値解析を行うことで、上記のモードとの比較を行った結果、8次までのモード形状(10Hz以下)を概ね再現することができた。

一方で、局所的な損傷を同定するために、パラメタを変化させて固有値解析を行い、得られたモード形状と比較した結果、モードに対する明瞭な変化が見られなかった。洗掘による杭の露出のような、非常に明瞭な剛性低下が見られるケースでは、モード特性から変化を追えるが、剛性低下量が顕著でない場合、または全体的に剛性が低下している場合については、固有振動数およびモード形状のみの情報から局所的な剛性低下の評価をすることは困難であることが示唆された。

## (2)床上下振動に関する局所損傷同定

建物2について、同様に床振動に対するアレー観測を行い、振動モード同定を行った。同建物では、床の裏面(天井)に明瞭な劣化が見られる箇所(同建物3階)と見られない箇所を選定し、同建物3,4階部のうち2スパン(全6スパン)の床を対象としてアレー観測を行い、上下成分記録のみを利用してFDD法による振動モード同定を行った。その結果、床裏面の劣化が最も激しい床に対して、8Hz付近で極端な振動モードが検出された(図3)。

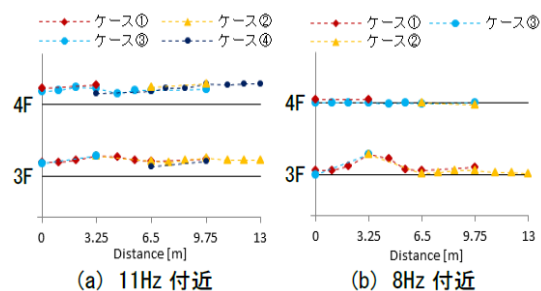


図3 スペクトルにピークが見られた振動数におけるモード形状の例(建物2)

FDD法に基づく上記の結果と局所的な損傷との関係を検証するため、2次元フレームモデルを作成、固有値解析を行った結果、床上下振動モードは水平方向の(例えば柱・梁の水平方向の剛性低下検出を対象とした)振動モードと比較して、着目すべき振動数帯域が高振動数域で広く、また出現モードの種類が多いという点で非常に複雑であり、各床が全体または個別に卓越する振動モードがあることが確認された。さらに、2次元フレームモデルによる数値実験からでは、観測記録から同定された固有振動数および固有モードとの整合を再現することは難しかった。一方で、例えば一つの床のみを抽出したFEMモデルからでは建物全体の上下振動から誘発される振動モードを表現することが難しかった。また、一つの床のみを抽出した場合は隣接する構造の影響との相互依存による振動モードは再現出来ない。このことは、床の上下振動に着目した局所的な損傷位置の同定においては、建物の部分的な構造のみを抽出した数値モデルによる同定が難しいことを示唆している。他方、建物全体を詳細にモデル化することは可能であるが、この場合は未知のパラメタが極端に増えることから、床単体の局所的な剛性低下等の状態を評価することは非常に難しい。これらの検討結果は、床の局所的な損傷を、振動モード特性のみから判断することは難しいことが示唆された。

そこで、別の簡便な方法として、ここでは上下振動のパワースペクトルに着目し、パワ

ースペクトルの基準化面積を各測定点で比較した(図4)。この結果、劣化の度合いが大きな床(図4に赤色で示す箇所)では、常に明瞭なパワーの増大が確認された。フレームモデルにおいて床剛性を变化させた場合の上下振動に対するパワー(パワースペクトルの面積)を算出した結果、同様の傾向が見られた。この方法では、多数の測定記録でなくとも、着目位置とリファレンスとなる箇所(損傷が見られず、かつ安定した柱上の箇所等)のみの測定からでも評価が可能と考えられる。このことから、パワースペクトル(の面積)は、床の部分的な損傷・劣化を大まかに評価するにあたり、簡便性の面からも振動モード特性より優れていると考えられる。

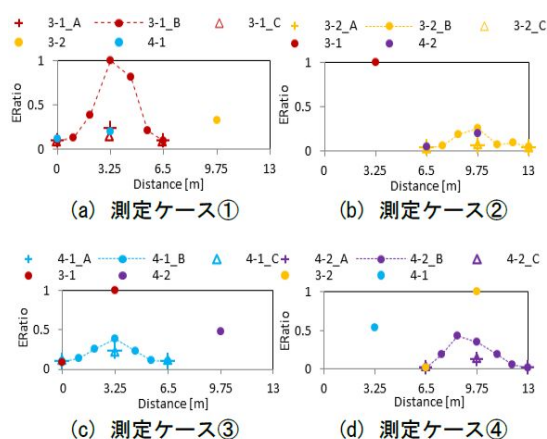


図4 各測定位置における上下振動パワースペクトル比(建物2)

なお、当該建物のように人間活動による外乱が極端に小さい環境での測定記録を対象とする場合、床の上下振動は(水平振動に比して)パワーが小さいため、センサの感度が低い場合にはS/N比が極端に低下することで各種同定が困難となる。このため常時微動を利用する場合は、環境に応じて利用するセンサの選定が必要となることを補足しておく。

### (3)局所的な測定を利用したモード特性同定

上述の検討は主に多数の測定記録を用いた方法であった。これには実用性に課題も残る。そこで、本研究では2測定点の観測×2回という少ない実測(1測定点を共通とし、全3測定点を解析に利用)から、振動モード特性を解析的に同定する方法を別途開発した。この方法は、振動理論に基づきモード特性を解析的に求める新たな提案である。具体的には、2測定点のクロススペクトルの組み合わせ(1点は共通)を用いてこれらの比を取ることで、クロススペクトル比を求める。各点のパワースペクトル、およびこのクロススペクトル比を利用することで、全ての振動モード特性を同定することが可能となる。この手法は、特にモード減衰定数を解析的に陽

な形で近似表現した点に新規性があり、かつ微動以外に地震動等、非定常入力に対する応答に対しても適用できる方法である。

### <引用文献>

飯山かほり, 栗田哲, 源栄正人: 建物の部分測定データを用いた FDD 法のモード同定の精度に関する考察, 第 10 回日本地震工学会大会梗概集, 2013.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計4件)

Iiyama, K., Imamoto, K., Iwata, N., Kusunoki, K., and Noguchi, T.: Vibrational Characteristics of severely deteriorated reinforced concrete buildings based on high-density array measurement of ambient vibration, International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS), Nagasaki, pp.1-10, 2015. < BEST PAPER AWARD 受賞>(長崎ブリックホール, 2015年6月3日発表)

飯山かほり, 今本啓一, 岩田直泰, 野口貴文, 楠浩一: 著しく劣化した鉄筋コンクリート建物の微動時振動性状, 日本建築学会近畿支部研究発表会, No.2032, 2015. (大阪工業技術専門学校6号館, 2015年6月28日発表)

Hamasaki, S., Iiyama, K., Mitsunaga, H., and Morikawa, H.: A method for modal identification of existing structures using microtremors, Proc. of 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE, 2017. (Santiago, 2017年1月9日ポスター発表)

満永仁志, 盛川仁, 飯山かほり: クロススペクトル比を用いたモード減衰定数の推定法に関する一考察, 土木学会全国大会, 2016. (東北大学川内キャンパス, 2016年9月8日発表)

[その他](計1件)

< Workshop への参加 > A method for estimation of modal damping factor using cross spectrum ratio, HKU-KU-TIT JOINT WORKSYOP at Centennial Campus, HKU

### 6. 研究組織

#### (1)研究代表者

飯山 かほり (IYAMA, Kahori)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・研究員  
研究者番号: 9 0 7 1 1 8 7 0

#### (2)研究協力者

盛川 仁 (MORIKAWA, Hitoshi)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・教授  
研究者番号: 6 0 2 7 3 4 6 3

小林 理一郎 (KOBAYASHI Riichiro)  
東京工業大学・環境・社会理工学院・大学院生